

文章编号: 1001-1986(2011)01-0016-04

郑庄区块煤层气赋存特征及控气地质因素

曹新款, 朱炎铭, 王道华, 赵 雯

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 沁水盆地南部郑庄区块煤层气资源条件良好, 勘探开发潜力大。通过对郑庄区块煤层气地质条件和储层条件的深入分析, 认为本区煤层气赋存条件良好, 含气量较高, 储层吸附/解吸能力较好, 但储层渗透率相对较低; 郑庄区块煤层气藏主要受 3 类地质因素控制: 构造对煤层气含量和赋存规律具有明显的控制作用; 水文地质条件对煤层气具有明显的水力封闭作用, 该区地下水径流较弱, 为典型的等势面扇状缓流型, 有利于区内煤层气的富集; 燕山晚期岩浆活动和高异常地热场对煤层热演化和煤层气生成有显著的控制作用。

关键词: 煤层气; 构造; 水文地质; 煤化作用; 郑庄区块

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2011.01.004

Analysis of the coal bed methane occurrence characteristics and gas-controlling geologic factors in Zhenzhuang block

CAO Xinkuan, ZHU Yanming, WANG Daohua, ZHAO Wen

(College of Resource and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: There exist good conditions of coalbed methane (CBM) resources condition in Zhengzhuang block in the south of Qinshui basin and great potential for exploration and development. After deeply analyzing the geological and reservoir conditions of Zhengzhuang block, it is believed that there are good occurrence conditions for CBM in this area, the gas content is high and the reservoir has good adsorption and desorption capacity, but the permeability is low. The coal gas reservoir is controlled by three geology factors. Among which, the structures obviously control the occurrence of CBM and the gas content, the hydrogeological conditions have an apparent effect on the coal-bed gas. In the area, the radial flow of ground water is weak and belongs to typical equipotential slow fan flow, which is favorable for CBM accumulation. Igneous activity in Late Yanshan and abnormal geothermal field obviously controlled the thermal evolution of coal and coalbed methane.

Key words: coal-bed methane; structure; hydrogeology; coalification; Zhenzhuang block

沁水盆地是国内煤层气勘探开发的重点区, 其南部晋城一带的煤层气田是盆地内煤层气开发的最有利地区。沁水盆地南部郑庄区块探明含气面积 692.64 km², 估计煤层气资源量达 1612.68 亿 m³, 煤层气资源丰富, 勘探开发潜力大。本文以郑庄区块山西组 3 号煤层为主要目的层, 拟通过对煤储层物性特征的综合分析, 进一步研究探讨该区块的控气地质因素。

1 地质背景

1.1 构造特征

沁水盆地南部煤层气田构造上处于沁水盆地南部晋城马蹄形斜坡带, 东为太行山复式背斜隆起,

南为中条山隆起, 西为霍山凸起, 北部与盆地腹部相接(以北纬 36°线为界)。郑庄区块位于沁水盆地南部晋城地区, 主体部分位于山西省沁水县境内, 处于寺头断层西侧。该区地层宽缓, 地层倾角平均 4°; 低缓、平行的褶皱普遍发育, 并呈近 SN 和 NNE 向, 褶皱的幅度相对较小, 背斜幅度一般小于 50 m, 延伸长度为 5~10 km, 呈典型的长轴线性褶皱; 断层相对不发育, 断距大于 20 m 的断层仅在西南部分布, 主要有寺头断层、后城腰断层以及与之伴生的断层, 呈一组 NE—EW 向正断层组成的弧形断裂带(图 1)。

1.2 煤质及变质程度

研究区山西组 3 号煤层变质程度较高, 属于无烟煤阶段, 且煤级呈现出由北向南明显递增的趋势。

收稿日期: 2010-05-09

基金项目: 国家科技重大专项课题(2008ZX05034-04); 国家自然科学基金重点项目(40730422)

作者简介: 曹新款(1984—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为煤层气地质学。

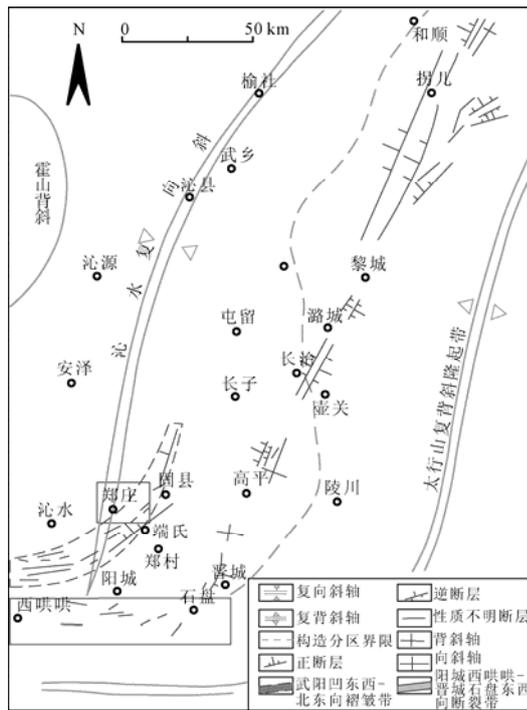


图 1 沁水盆地南部构造纲要图

Fig. 1 Tectonic outline in southern Qinshui basin

区内煤宏观煤岩类型主要以半亮煤为主, 其次为光亮煤; 显微组分以镜质组为主, 其次为惰质组; 灰分平均为 12.98%, 属于低灰煤; 挥发份(V_{daf})平均为 7.08%; 水分(M_{ad})平均为 1.34%。

1.3 盖层条件

本区山西组 3 号煤厚度全区内比较稳定, 约为 5.0~7.0 m, 且呈现出由南向北缓慢递增的趋势; 大部分地区煤层埋深相对较浅, 为 500~1 000 m。顶板岩性比较稳定, 直接盖层为厚数米到数十米的灰黑色泥岩和碳质泥岩组合, 泥岩厚度大、质纯、致密坚硬, 岩心未见裂缝, 其泥岩突破压力为 8~15 MPa, 是一套非常好的封盖层。

1.4 水文地质条件

沁水盆地南部存在奥陶系、石炭 - 二叠系和第四系 3 套主要含水层系。含水层主要为碳酸盐岩、砂岩和松散沉积层^[1-2]。郑庄区块西侧的沁水、浮山一线及南面阳城北为开放性边界, 东面寺头断层为北东向阻水边界, 北面水体由北向南汇流, 在寺头断层西侧至郑庄一带水位等势面呈扇形, 在扇端部形成小范围的滞水地带, 地下水径流强度相对较弱, 有利于煤层气的保存^[2]。

2 煤储层特征

2.1 煤储层的孔隙、裂隙特征

煤的孔隙性质(包括孔隙大小、形态、连通性、孔容、比表面积等)是研究煤层气赋存状态、煤中气体

(主要是甲烷)的吸附/解吸性能及其在煤层中运移的基础。研究区煤储层孔隙以微、小孔占绝对优势, 大孔次之, 中孔不发育为特征, 且据孔形分析知, 区内含有相当数量的半封闭孔。故整体而言, 本区储层孔隙发育特征影响煤储层的渗透性, 这将不利于煤层气的开发。

煤中裂隙是决定煤层渗透性的关键因素。煤层裂隙划分为宏观裂隙和微观裂隙^[3-5]。本区的宏观裂隙中, 割理发育; 微观裂隙中, 显微裂隙和超显微裂隙较为发育。显微裂隙成为衔接扩散的重要渗流通道, 超显微裂隙往往是煤层气扩散的良好通道, 从而提高了煤层气的扩散强度。

2.2 煤储层的渗透性

煤层渗透性是衡量煤层中气 - 水流体在压力差作用下通过有效孔隙流动能力的参数, 用渗透率表示。它的好坏直接影响煤层气的产气速率和产气历程, 其值大小取决于煤层的裂隙、孔隙的多少及连通性。研究区试井渗透率统计表明, 3 号煤层属于低 - 中渗透率煤储层, 低渗透率储层相对发育; 宏观裂隙中, 内生裂隙(割理)发育程度明显较中、低煤级煤储层要差, 这是渗透率相对较低的主要原因, 而地下水携带的矿物质在某些范围内的煤层割理沉淀, 割理被充填, 则是导致煤储层渗透率降低的另一原因^[6]。另外, 本区煤储层渗透率随埋藏深度增加呈降低趋势。

本区煤储层渗透性表现出沿断层带方向(NE-SW 向)呈带状分布, 靠近断层带, 渗透性较好, 断层稀疏地区, 渗透性较差。综合考虑储层渗透率与含气量关系, 郑庄区块富集高渗的面积较小, 区块内的高渗极有利区和有利区主要分布在中北部, 靠近向斜核部的斜坡部位, 该区域是含气量大于 $20 \text{ m}^3/\text{t}$ 及渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的复合区; 较有利区分布于研究区的大部, 即含气量为 $10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{t}$, 且渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的复合区; 不利区在靠近后城腰及寺头断层控制的断裂带, 呈条带状分布, 储层的含气性降低, 一般小于 $10 \text{ m}^3/\text{t}$, 而渗透性明显升高, 在断层带上出现贫气高渗区, 研究认为该区域不利于煤层气勘探开发。

2.3 煤储层吸附性

煤的吸附性能决定着煤层的储集能力和产出特征, 其通常用吸附常数 V_L (Langmuir 体积)和 P_L (Langmuir 压力)和等温吸附曲线来描述。本次研究选取该区 40 口煤层气井的 3 号煤层煤样进行吸附试验, 试验结果表明: 区内煤层的空气干燥基 V_L 为 $26.58 \sim 44.90 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均 $37.02 \text{ cm}^3/\text{g}$; 干燥无灰基 V_L 为 $32.94 \sim 50.55 \text{ cm}^3/\text{g}$, 平均 $42.37 \text{ cm}^3/\text{g}$, 表明区

内煤储层具有较好的吸附能力，且干燥无灰基条件下的吸附能力显著高于空气干燥基条件下的。

研究区内煤储层的吸附量随压力变化呈现出明显的阶段性。由区内具有代表性的 Js1 井 3 号煤层煤样的等温吸附曲线(图 2)可以看出：在 0~8 MPa 区间内，随着压力的增高，吸附增量变化较明显，其中以 0~3 MPa 间变化最显著，平均吸附增量为 7.62 m³/(t·MPa)；3~8 MPa 间平均吸附增量为 1.95 m³/(t·MPa)；8 MPa 以后的吸附增量微乎其微。由此看出，区块内煤层具有较好的吸附、解吸能力，表现为高 Langmuir 体积、高理论解吸量。

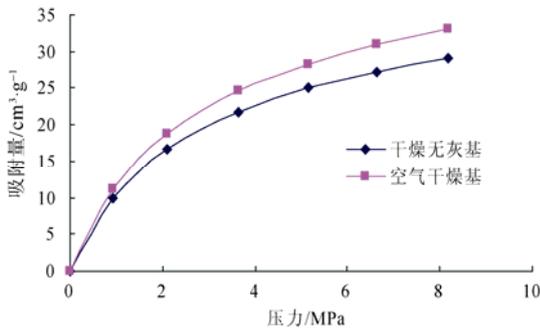


图 2 Js1 井 3 号煤层等温吸附曲线
Fig. 2 Adsorption isotherm of seam No.3

3 煤层气含量及其变化规律

由图 3 可以看出，郑庄区块煤层含气量一般为 10~20 cm³/g，而含气量 >20 cm³/g 的区域主要位于本区北部，中部也有零星分布；煤层含气量 <10 cm³/g 的区域主要分布于区块西部。含气量值的分布与构造也呈现出明显的相关性，高值区 (>20 cm³/g) 主要位于区内发育的 NNE 向复式向斜中的次级背斜和次级向斜两翼，形态上受向、背斜形迹限制而呈现条带状，或位于断层及褶皱均不发育的地带；中值区 (10~20 cm³/g) 主要位于区内发育的 NNE 向复式向斜中的次级向斜两翼；低值区 (<10 cm³/g) 分布区域较零星，可能是由于局部构造等地质原因而导致煤储层含气量值较低。

4 煤层气控气地质因素分析

影响煤层气的地质因素很多，如煤厚、埋藏深度、构造、煤的物理化学性质、煤层顶板岩性、水文地质和煤化作用等，只是各种因素影响的显著性有差异。通过对郑庄区块内煤层气地质条件和煤储层特征的分析研究发现，控制该区块煤层气含气性的主要因素是构造、水文地质和煤化作用。

4.1 构造控气

由煤层构造图和含气量等值线图叠加对比(图 3)，

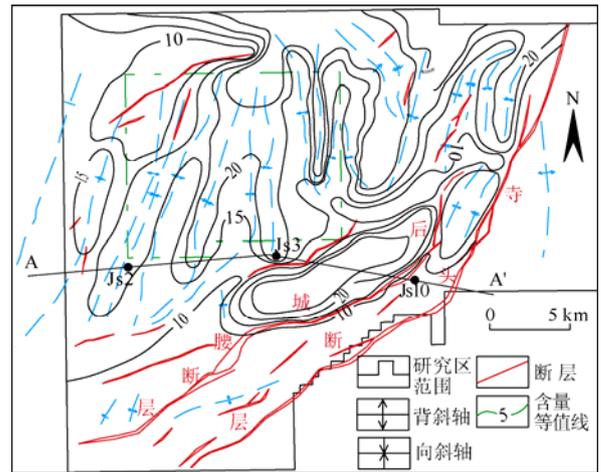


图 3 研究区构造与 3 号煤层含气量分布图
Fig. 3 Structure and gas content distribution of seam No.3 in study area

可以分析构造对含气性的控制规律，特别是实测含气量变化与所处构造部位关系的讨论，有助于提供控气规律的具体证据^[7-9]。

由图 3 可看出，郑庄区块实测含气量最大值均出现在向斜仰起端，大于 25 cm³/g 的含气量值均出现在向斜核部或紧挨向斜核部的部位(如 Js3 孔，含气量 26.98 cm³/g)；在背斜核部，含气量明显降低(如 Js4 孔，含气量 10 cm³/g)，靠近背斜核部的部位含气量也较总体平均值低；含气量最小值(1.49 cm³/g)出现在 Js10 孔附近，根据实钻资料和录井测井及地震资料共同推断，该钻孔位于开放性断层上，造成煤层气逸散，是其含气量低的主要原因；受褶皱发育及断裂构造共同影响的部位，含气量控制在最大与最小值之间，由向斜和正断层组合的区域，其含气量较由背斜和正断层组合的区域的含气量大(图 4)。

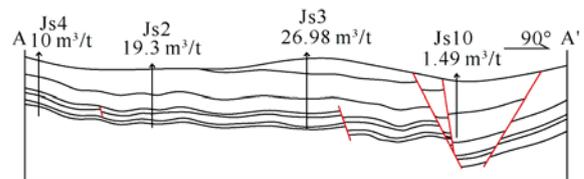


图 4 构造部位与煤层含气量变化关系图(AA'剖面)
Fig. 4 The relationship between structure and gas content (AA' section)

郑庄区块控制煤层气含量的主要构造因素为次级褶皱和正断层。在向斜的仰起端及向斜核部，煤层气含量明显升高，背斜核部含气量较低，而开放性断层附近，含气量为全区最低。

地质构造的控气机理主要是地质构造影响煤层气保存条件，而非影响煤层气的运移聚集，因此，在易发生解吸逸散的构造部位，即正断层附近或裂隙发育的背斜核部，煤层气含量低；而在裂隙不发

育的向斜核部, 煤层气含量高。

4.2 水文地质控气特征

水文地质条件是影响沁水盆地南部煤层气封存富集的另一重要因素。煤层气是以吸附状态赋存于煤的孔隙中, 地层压力通过煤中水分对煤层气起封闭作用, 所以, 水文地质条件对煤层气的保存和运移影响很大^[10]。根据水文地质条件和构造部位, 王红岩^[1]、傅雪海^[2]等把沁水南部煤层气的水力封闭作用分成“滞流”和“缓流”两大类, 包括 3 种类型: 等势面“洼地”滞流型、等势面箕状缓流型、等势面扇状缓流型。

郑庄区块西侧沁水、浮山一线及南面阳城北为开放性边界, 东面寺头断层为 NE 向阻水边界, 等水位线呈北高南低的总体趋势, 地下水补给主要来自西北部地区, 水体由北向南、由西北向西南方向汇流, 郑庄区块太原组含水层水位等势面呈扇形, 在扇端部形成小范围的滞水地带(图 5), 地下水径流强度相对较弱, 利于煤层气的保存。受寺头断层阻水特征的影响, 山西组含水层等势面格局展布和太原组等势面相似, 地下水径流从北和西北向南、东南方向汇集, 但等势面坡度相当平缓, 表明径流强度可能较弱, 煤层气随地下水运移的逸散作用相对较弱。由此可以判断, 郑庄区块为典型的等势面扇状缓流型。

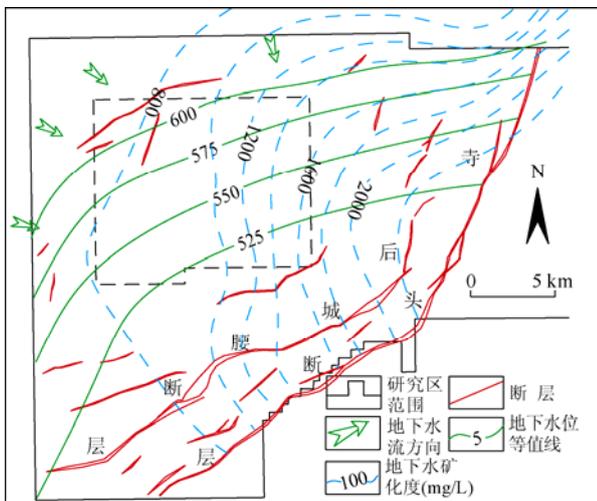


图 5 太原组灰岩含水层水位及矿化度等值线

Fig. 5 Water level and salinity contour of Taiyuan limestone aquifer

区内主煤层的区域含气性规律与地下水等势面总体形态之间具有对应关系(图 5), 等势面总体上由北向南、由西北向西南方向降低, 水动力学条件随之减弱, 距补给区的距离沿等势面降低方向逐渐增大。而主煤层含气量则展现出南高北低、东高西低的总体态势, 在西北部补给区附近, 主煤层含气量较低; 在远离补给区且等势面明显较低的东南部

一带, 主煤层含气量显著增高。高含气量区域与地下水等水位线的局部“低洼”地带高度吻合, 地下水明显滞流是导致郑庄区块主煤层含气量高的主要原因。

地下水化学场也可进一步说明上述地下水流场特征。郑庄区块大部分地区矿化度大于 1 000 mg/L, 在太原组灰岩含水层高矿化度中心, 矿化度在 2 000 mg/L 以上。这些地域与高含气量地带空间分布高度一致的规律, 进一步揭示出地下水滞流或缓流对煤层气保存富集的重要作用, 是预测未知有利区段的重要依据。

4.3 煤化作用控气特征

研究区的煤层经历了晚石炭世至早二叠世末、中晚二叠世至晚三叠世末、早侏罗世、中侏罗世和晚侏罗世至现今等 5 个埋藏阶段; 遭受了晚石炭世 - 中侏罗世的正常古地温、晚侏罗世 - 白垩纪末异常高地温场和新生代正常古地温场, 期间发生 2 次生气过程^[11]。

在印支期生成了大量的甲烷被吸附在煤层中, 但印支期末, 地壳抬升, 剥蚀作用明显, 导致被吸附的煤层气部分损失; 燕山晚期, 岩浆活动和构造热事件使得研究区处于异常古地温场, 其古地温梯度可达 4~6 °C/km, 甚至更高, 由于热事件的影响, 在燕山期晚侏罗世开始至白垩纪末, 虽然区块整体处于缓慢抬升阶段, 但石炭 - 二叠系煤层所处的温度已远远超过三叠纪末最大埋深时的温度, 煤层发生再次煤化作用, 产生大量的甲烷, 补充吸附到煤层中。燕山晚期, 岩浆活动和高异常地热场对 3 号煤层的热演化和煤层气生成将有显著的控制作用, 也是形成高煤阶煤层气藏的重要原因。

郑庄区块 3 号煤层主要为无烟煤 III 号, R_o 为 2.3%~3.68%, 经历了 2 次煤化作用, 进而导致 2 次生气过程, 特别是第 2 次煤化作用对本区煤层气的生成起到主导作用。现今的煤级较高, 说明第 2 次煤化作用较强, 且第 2 次生气量大, 煤层含气量较高, 使得本区成为煤层气勘探开发的极有利区域。

5 结论

a. 郑庄区块煤层气赋存条件良好, 含气量较高, 储层吸附、解吸能力较好, 表现为高 Langmuir 体积、高理论解吸量; 但储层渗透率相对较低, 成为研究区煤层气开发的不利因素。

b. 地质构造影响煤层气保存条件, 在向斜的仰起端及向斜核部, 煤层气含量明显升高; 背斜核部含气量较低; 而开放性断层附近含气量为全区最低。

c. 本区地下水径流较弱, 为典型的等势面扇状缓流型, 地下水明显滞流是导致主煤层含气量高的主要原因。

(下转第 23 页)

线性方程截距为正值, 吸附行为难于完成; 解吸过程吸热, 线性方程截距为负值, 解吸过程也难于完成。因此可知, 解吸过程的热变化总在阻碍解吸作用的持续进行。

5 讨论

物理吸附的 Langmuir 表达式中, a 为饱和吸附量(极限吸附量), b 为吸附系数^[7],

$$b = \frac{k_a}{k_d} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi mkT}} \quad (5)$$

其中 k_a 、 k_d 分别为吸附、解吸速率; m 为气体分子质量; k 为 Boltzmann 常数; T 为热力学温度。

根据 Boltzmann 能量分布原理, 解吸分子数与 $\exp(-q/RT)$ 成正比:

$$k_d = A \cdot \exp[-q/(RT)] \quad (6)$$

其中 A 为比例系数, q 为吸附热。

煤层气井生产中, 通过人为干预降压井底流压, 促使储层压力与井底流压产生压差, 压差越大, 导致储层表面吸附/解吸平衡破坏, 物理吸附态的煤层气分子解吸为游离态或物理吸附态煤层气含气量产生梯度降, 最终在孔隙系统解吸气体的分子数增加。而真正要促进解吸气体的分子数增加, 需要提高解吸速率 k_d 。由式(5)、式(6)可以看出, 提高解吸速率 k_d 的最终途径是降低吸附热 q 或提高储层温度 T 。由于地质历史时期形成的煤层气储层中吸附速率 k_a 已经基本确定, 最终提高解吸效率的途径是减小 b 值或增加 T 值, 而由表 1 可以看出, b 值减小依然是在较高温度进行解吸来实现。因此, 促进储层解吸作用内在动力是储层温度升高, 同时, 储层温度增大也降低了煤层气解吸过程热变化的阻碍。

由表 1 可以看出, 在现有降压解吸的基础上, 促进煤层气储层温度增加, 一方面可以促进解吸量的增加, 另一方面提高解吸速率(6 个温度点实验获得 b_d 在 40 时最低, 是目前储层温度解吸速率的 20 倍左右), 最终促进煤层气解吸作用。

6 结论

- 随着煤层气储层温度升高, 饱和吸附量减小。
- 解吸滞后于吸附作用的原因主要是非物理吸附常数 c 值的作用。随着储层温度增高, c 值增大。
- 降压解吸伴随吸热(煤储层温度在解吸范围降低), 同时阻碍了持续解吸过程, 通过提高储层温度来促进解吸过程, 在理论上是可行的, 工程中应该受到重视。

参考文献

- [1] 张新民, 郑玉柱. 煤层气与煤炭资源协调开发浅析[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(3): 19-26.
- [2] 崔永君, 张庆玲, 杨锡禄. 不同煤的吸附性能及等量吸附热的变化规律[J]. 天然气工业, 2003, 23(4): 130-131.
- [3] 陈润, 秦勇, 王爱宽, 等. 煤层气分馏效应研究进展及其应用[J]. 中国煤炭地质, 2009, 21(6): 27-32.
- [4] 马东民, 韦波, 蔡忠勇. 煤层气解吸特征的实验研究[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1432-1436.
- [5] 王保玉. 对煤的最大含气量问题的讨论[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(4): 674-679.
- [6] 徐锋, 吴强, 张保勇. 煤层气水合物的基础研究[J]. 化学工程, 2009, 37(2): 63-66.
- [7] 陈振宏, 贾承造, 宋岩, 等. 高煤阶与低煤阶煤层气藏物性差异及其成因[J]. 石油学报, 2008, 29(3): 179-184.

(上接第 19 页)

d. 两次煤化作用导致两次生气过程的发生, 使得该区内煤层气含量较高, 成为煤层气勘探开发的极有利区域。

参考文献

- [1] 王红岩, 张建博, 刘洪林. 沁水盆地南部煤层气藏水文地质特征[J]. 煤田地质与勘探, 2001, 29(5): 33-36.
- [2] 傅雪海, 秦勇, 王文峰, 等. 沁水盆地中-南部水文地质控气特征[J]. 中国煤田地质, 2001, 13(1): 31-34.
- [3] 苏现波, 冯艳丽, 陈江峰. 煤中裂隙的分类[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(4): 21-24.
- [4] 曾勇, 屈永华, 宋金宝. 煤层裂隙系统及其对煤层气产出的影响[J]. 江苏地质, 2000, 24(2): 91-94.
- [5] 王生维, 陈钟惠. 煤储层孔隙、裂隙系统研究进展[J]. 地质科技情报, 1995, 14(1): 53-58.
- [6] 刘大锰. 煤储层物质非均质性控制因素分析[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [7] 张德民, 林大扬. 我国煤盆地区域构造特征与煤层气开发潜力[J]. 中国煤田地质, 1998, 10(增刊): 37-40.
- [8] 叶建平, 秦勇, 林大扬. 中国煤层气资源[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [9] 叶建平, 武强, 叶贵均, 等. 沁水盆地南部煤层气成藏动力学机制研究[J]. 地质论评, 2002, 48(3): 319-323.
- [10] 彭金宁, 傅雪海. 铁法矿区煤层气保存条件研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 65-67.
- [11] 秦勇, 宋党育, 王超. 山西南部晚古生代煤的煤化作用及其控气特征[J]. 煤炭学报, 1997, 22(3): 230-235.